

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



Кондрахова Дар'я Миколаївна

УДК 538.975:[538.955+537.622]

**ВЗАЄМНИЙ ЗВ'ЯЗОК ВЛАСТИВОСТЕЙ І СТРУКТУРИ
ПЛІВКОВИХ ЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТІВ СЕНСОРІВ МАГНІТНОГО
ПОЛЯ**

01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Суми – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Наукові керівники: заслужений діяч науки і техніки України,
доктор фізико-математичних наук, професор
Проценко Іван Юхимович,
Сумський державний університет,
завідувач кафедри прикладної фізики;

доктор наук, професор
Герд Шенхенце (Gerd Schönhense),
Інститут фізики Університету ім. Й. Гутенберга
(м. Майнц, Німеччина),
завідувач лабораторії КОМЕТ 334.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Чепурних Геннадій Кузьмич,
Інститут прикладної фізики НАН України (м. Суми),
провідний науковий співробітник відділу
моделювання радіаційних ефектів та
мікроструктурних перетворень у конструкційних
матеріалах;

доктор фізико-математичних наук, професор
Семенько Михайло Петрович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка, професор кафедри фізики металів.

Захист відбудеться «29» травня 2015 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 Сумського державного університету за
адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус БЦ, ауд. 307.
e-mail: kondrakhova.darya@gmail.com

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного
університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розіслано «28» квітня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



І. В. Чешко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сенсорного приладобудування потребує створення плівкових датчиків зі стабільними та наперед заданими робочими характеристиками. Перспективними із цієї точки зору є плівкові системи на основі магнітних (Co або Fe) та немагнітних (Cu або Cr) компонентів із можливим спін-залежним розсіюванням електронів, які широко використовуються як елементна база для створення приладових структур мікроелектроніки, спінтроники та сенсорної техніки, через реалізацію в них явища гігантського магнітоопору та стабільності їх вихідних робочих характеристик під дією температури й часу.

Також системи на основі зазначених металів широко застосовуються при виготовленні датчиків магнітного поля зі стабільними та наперед заданими параметрами за рахунок можливості реалізації на їх основі різних варіацій плівкових систем, таких як гранульовані структури, мультишари або спін-клапани.

На сьогодні потрібне подальше вивчення особливостей формування та застосування у мікроприладобудуванні багат шарових плівкових систем на основі магнітних і немагнітних компонентів, що чергуються або змішуються, у вигляді мультишарів, твердих розчинів чи гранульованих сплавів як чутливих елементів сенсорів. Необхідні подальші дослідження, які зможуть більш детально пояснити вплив термовідпалювання та структурно-фазового стану на величину магнітоопору (MO), чутливості до магнітного поля (S_B) та коерцитивної сили (B_C) в цих системах, що можуть бути використані як первинні перетворювачі сенсорів магнітного поля.

Вищезазначене свідчить про актуальність теми даної роботи та доцільність вивчення взаємозв'язку кристалічної структури і магніторезистивних, магнітних та магнітооптичних властивостей багат шарових плівкових систем на основі Co і Cu або Cr та Fe і Cu або Cr як чутливих елементів сенсорів магнітного поля.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася на кафедрі прикладної фізики Сумського державного університету відповідно до держбюджетних НДР № 0109U001387 «Фазовий склад, електро- і магніторезистивні властивості плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів» (2009 – 2011 рр.) та № 0112U001381 «Електрофізичні і магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових матеріалів із спін-залежним розсіюванням електронів» (2012 – 2014 рр.) та згідно з державною програмою МОН України «Навчання студентів і аспірантів та стажування наукових і науково-педагогічних працівників у провідних вищих навчальних закладах та наукових установах за кордоном» згідно з договором між Сумським державним університетом та Інститутом фізики, Університету ім. Й. Гутенберга (м. Майнц, Німеччина) у рамках

індивідуального плану у 2012 році.

Дисертант брав участь у виконанні зазначених НДР як виконавець наукових досліджень та під час підготовки звітів.

Мета і задачі досліджень. Мета дисертаційної роботи полягала у проведенні комплексних експериментальних досліджень особливостей структурно-фазового стану, магніторезистивних та магнітооптичних властивостей багат шарових плівкових систем на основі Co і Cu, Co і Cr, Fe і Cu та Fe і Cr як можливих матеріалів чутливих елементів сенсорів різного призначення.

Відповідно до мети роботи були розв'язані такі задачі:

- вивчені процеси фазоутворення у двокомпонентних багат шарових плівкових системах на основі металів із спін-залежним розсіюванням електронів;
- установлені умови стабілізації та розпаду неперервних твердих розчинів (т. р.) – (Fe, Cr) і (Cu, Co) з елементами гранульованого стану, а також особливості фазоутворення в плівкових системах на основі Fe і Cu та Co і Cr з обмеженою розчинністю компонент;
- установлено взаємозв'язок між особливостями структурно-фазового стану багат шарових плівкових систем на основі магнітних (Co або Fe) та немагнітних (Cu або Cr) компонент і кутом орієнтації зразка у зовнішньому магнітному полі та величиною магнітоопору, коерцитивною силою, намагніченістю (M) і магнітооптичним ефектом Керра (МОКЕ);
- вивчено вплив розміру наночастинок Co із оболонкою оксидної фази (CoO та Co₃O₄) на коерцитивну силу та поле обмінного зміщення;
- проведені розрахунки величини анізотропного магнітоопору (АМО), коефіцієнта прямокутності (KIT) і чутливості плівкової системи до магнітного поля досліджуваних плівкових систем як функціональних елементів первинних перетворювачів.

Об'єкт дослідження – фізичні й технологічні процеси в чутливих елементах сенсорів магнітного поля, формування яких супроводжується конденсаційно-стимульованою і термічною дифузією та фазоутворенням.

Предмет дослідження – фазовий склад, магніторезистивні та магнітооптичні властивості плівкових структур на основі Co і Cu або Cr та Fe і Cu або Cr.

Методи дослідження: метод пошарової конденсації металів у вакуумі, просвічуюча електронна мікроскопія, вимірювання поздовжнього та перпендикулярного магнітооптичних ефектів Керра, чотириточковий метод вимірювання магнітоопору за допомогою автоматизованого комплексу, метод вібраційної магнітометрії, спектроскопія втрат енергії електронів (EELS) та метод енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX) для реєстрації рентгенівського випромінювання від зразків та вимірювання спектрів характеристичних втрат енергії легких елементів.

Наукова новизна отриманих результатів. Проведені в роботі комплексні

експериментальні дослідження взаємозв'язку кристалічної структури, фізичних процесів, магнітних, магнітооптичних і магніторезистивних властивостей багатошарових плівкових систем із можливим спін-залежним розсіюванням електронів дозволили отримати такі нові результати:

1. Запропонована методика виготовлення чутливого елементу сенсора магнітного поля на основі двох типів плівкових систем у вигляді багатошарової плівкової структури, а саме: системи, у якій залежно від концентрації магнітної компоненти та умов подальшої термообробки можливе утворення т. р. (Co, Cu) та (Fe, Cr), або системи, в якій можливе збереження індивідуальності шарів (Co і Cr та Fe і Cu).

2. Знайшло подальшого розвитку дослідження магнітооптичних властивостей плівкових систем з різним типом розчинності компонент (Co і Cu або Cr та Fe і Cu або Cr). Встановлена кореляція між структурно-фазовим станом та величиною магнітоопору і магнітооптичним ефектом Керра багатошарових плівкових систем як основи для формування первинних перетворювачів.

3. Уперше проведені дослідження структурно-фазового стану наночастинок Co, отриманих із оксидною оболонкою (CoO або Co₃O₄), та їх магнітних властивостей під дією температур.

4. На основі аналізу результатів досліджень фізичних властивостей та магнітних характеристик тришарових плівкових систем Co/Cr/Co, Co/Cu/Co, Fe/Cu/Fe та Fe/Cr/Fe визначено можливі області застосування цих систем як чутливих елементів сенсорів магнітного поля.

5. Уперше досліджено вплив орієнтації зразка у зовнішньому магнітному полі та дії температур термообробки на магнітні та магніторезистивні властивості багатошарових плівкових систем (на основі Co і Cu або Cr та Fe і Cu або Cr), що дає можливість створювати чутливі елементи із наперед заданими стабільними робочими характеристиками.

Практичне значення отриманих результатів. Наукові результати, отримані у ході виконання дисертаційної роботи, зокрема запропоновані схематична конструкція та методика виготовлення чутливого елементу на основі багатошарових плівкових систем із спін-залежним розсіюванням електронів (Co/Cr/Co, Co/Cu/Co, Fe/Cu/Fe та Fe/Cr/Fe), мають важливе практичне значення під час створення в подальшому термостійких сенсорів із високою чутливістю до зміни зовнішнього магнітного поля. Результати можуть бути використані при створенні чутливих елементів сенсорів магнітного поля зі стабільними та наперед заданими характеристиками і різноманітними варіаціями складових елементів, що важливо із прикладної точки зору.

Фундаментальне значення одержаних результатів полягає у подальшому розвитку уявлень про взаємозв'язок між особливостями структурно-фазового стану та магнітними властивостями у первинних перетворювачах на основі багатошарових плівкових систем із різним типом розчинності компонент

(необмежена або обмежена розчинність, псевдосплав), що разом із результатами щодо магніторезистивних та магнітооптичних властивостей дає розуміння процесів, які відбуваються в системах при зміні структурно-фазового стану.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень. Автор особисто отримувала зразки, проводила вимірювання, обробку та інтерпретацію отриманих результатів, здійснювала комп'ютерні розрахунки, а також проводила магніторезистивні та електронно-мікроскопічні дослідження.

Проценко І.Ю. – запропонував тематику дисертаційної роботи та вніс визначальний внесок у постановку всіх задач. Узагальнення результатів досліджень зроблено спільно з науковими керівниками проф. І.Ю. Проценком та проф. Г. Шенхенсе. Вимірювання магнітооптичного ефекту Керра були проведені за консультацій проф. С. О. Непійка (Інститут фізики, Університету ім. Й. Гутенберга). В обговоренні результатів досліджень брали участь к.ф.-м.н. Синашенко О. В., к.ф.-м.н. Чешко І. В. та к.ф.-м.н. Пазуха І. М. Особисто автором підготовлено 2 статті [2, 4], 5 тез доповідей [12, 13, 15 – 17] та окремі розділи статей [5, 6]. Основні наукові результати доповідались особисто автором на наукових конференціях і семінарах.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: науково-технічних конференціях «Фізика, електроніка, електротехніка» Сумського державного університету (Суми, 2012 – 2013 рр.); XV Міжнародній конференції «Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems» (Івано-Франківськ, 2013 р.); Міжнародних конференціях студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (м. Львів, 2011 – 2014 рр.); XLVI Zakopane School of Physics International Symposium (Закопане, Польща, 2011 р.); Міжнародній конференції «Clusters and Nanostructured Materials» (м. Ужгород, 2012 р.); III Міжнародній конференції молодих вчених «Low Temperature Physics» (м. Харків, 2012 р.); Conference of Electronic Engineering and Technology in the 12th International Youth Forum «Electronics and Youth in the XXI century» (Харків, 2012 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 19 публікаціях, серед них: 6 статей, надрукованих у фахових наукових виданнях, зокрема 2 статті в журналах, що індексуються науково-метричною базою даних Scopus; 2 статті опубліковані у зарубіжних виданнях; 1 стаття у матеріалах конференції та 15 тез доповідей. Назви основних публікацій наведені у списку опублікованих праць.

Структура і зміст роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел із 199 найменувань на 20 сторінках. Дисертацію викладено на 185 сторінках, із них 103 сторінки основного тексту; вона містить 61 рисунок і 19 таблиць, зокрема 41 рисунок і 18 таблиць на 47 окремих аркушах.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й основні задачі дослідження, визначені методи досліджень та наукова новизна, практичне значення отриманих результатів та їх апробація, відмічений зв'язок роботи з науковими темами та науково-дослідними проектами. Наведено інформацію про особистий внесок здобувача та структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Фізичні і технологічні основи плівкової сенсорики (літературний огляд)» проведено огляд літературних даних щодо процесів фазоутворення та взаємної дифузії атомів у багатошарових плівкових системах.

У *першому підрозділі* описані фізичні основи формування чутливих елементів сенсорів на прикладі спін-клапанних структур. Також розглянуто можливість застосування плівкових систем із спін-залежним розсіюванням електронів як чутливих елементів анізотропних магніторезистивних (АМР) датчиків.

У *другому підрозділі* проведено аналіз фізичних процесів у первинних перетворювачах на основі плівкових систем із різним типом розчинності компонент. Проаналізовано особливості фазоутворення та кристалічної структури тришарових плівок на основі Co і Cu або Cr та Fe і Cu або Cr.

У *третьому підрозділі* розглянуто особливості магніторезистивних та магнітооптичних властивостей плівкових систем на основі магнітних (Co або Fe) та немагнітних (Cu або Cr) компонент, що визначають області їх застосування як функціональних елементів при створенні різноманітних датчиків. Із урахуванням їх структурно-фазового стану, магніторезистивних, магнітооптичних та магнітних властивостей наведено можливу схему тонкоплівкового АМР-датчика як переважного приладу для застосування плівкових систем.

Проведено огляд особливостей магнітних, структурних та магніторезистивних властивостей наночастинок феромагнітного матеріалу, розміщених у немагнітній матриці, що використовуються для створення чутливих елементів датчиків магнітного поля, жорстких дисків із надвисокою щільністю запису інформації, магнітних нанопристроїв та ін.

У **другому розділі** «Методика і техніка експерименту» описані методи отримання багатошарових плівкових систем на основі феромагнітних (Co і Fe) та немагнітних шарів (Cu і Cr) та вивчення їх структурно-фазового стану, магніторезистивних, магнітних та магнітооптичних властивостей.

Отримання одно-, дво- та багатошарових плівкових зразків на основі магнітних шарів (Fe або Co) та немагнітних прошарків (Cr або Cu) із подальшою термообробкою проводилось у робочому об'ємі вакуумної установки ВУП-5М із тиском залишкових газів $P \sim 10^{-4}$ Па. Для легкоплавких матеріалів (Cu) використовувався метод термічного, а для тугоплавких –

електронно-променевого (Fe, Co і Cr) випаровування. Для контролю товщини плівок у процесі конденсації використовувався метод кварцового резонатора. Мультишари на основі Co і Fe були отримані методом термічного випарування у надвисоковакуумній установці ($P \sim 10^{-8}$ Па). Наночастинки Co отримувалися методом конденсації пари з потоку інертного газу з їх подальшим окисленням в атмосфері кисню.

Вивчення процесів фазоутворення та дослідження кристалічної структури отриманих плівкових зразків проводилося з використанням методу просвічуючої електронної мікроскопії (ПЕМ). Дослідження структури однодомених частинок Co проводилося за допомогою просвічуючого електронного мікроскопа Теспаі 20F із високою роздільною здатністю методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії та методом вимірювання спектрів характеристичних втрат енергії легких елементів.

Магнітні та магнітооптичні властивості вивчалися за допомогою SQUID-магнітометра (для наночастинок Co) та вібраційного магнітометра VSM і установки для дослідження магнітооптичного ефекту Керра (для багатошарових плівкових систем на основі феромагнітних (Co або Fe) та немагнітних шарів (Cu або Cr)) у двох геометріях вимірювання відповідно. Дослідження магнітоопору для отримання інформації про магніторезистивні властивості досліджуваних зразків з можливим подальшим використанням їх як чутливих елементів датчиків магнітного поля відбувалося у трьох геометріях вимірювання (поздовжній, поперечній та перпендикулярній) за допомогою автоматизованого комплексу.

Третій розділ «Процеси фазоутворення в чутливих елементах у вигляді спін-вентильних систем» складається з трьох підрозділів.

У *першому підрозділі* наведено результати досліджень фазового складу свіжесконденсованих та термооброблених до температури відпалювання $T_g = 750$ К одношарових плівок Co, Fe, Cu та Cr. Установлено, що всі отримані плівки мали кристалічну решітку, яка відповідає масивним зразкам (ОЦК-Fe, ГЦП-Co, ГЦК-Cu та ОЦК-Cr). Аналізуючи результати дослідження структурно-фазового стану одношарових плівок Co, Fe, Cu та Cr, можна зробити висновок, що термообробка у температурному інтервалі $T_g = 300 - 750$ К не призводить до істотних змін фазового складу в досліджуваних плівках.

Як свідчать дані електронографічних досліджень (рис. 1), дво- та тришарові плівкові системи Co/Cu/Co/П втрачають індивідуальність шарів ще в процесі пошарової конденсації компонент. У випадку, коли загальна концентрація Co компоненти перевищувала концентрацію Cu більш ніж удвічі, на електронограмах від свіжесконденсованих зразків та після термообробки до 700 К поряд із лініями від ГЦК-т.р. (Cu, Co) та оксиду Cu_2O також фіксувалися лінії від ГЦП-Co. Така поведінка свідчить про те, що не всі атоми Co беруть участь в утворенні твердого розчину.

Аналіз результатів електроннографічних досліджень свідчить про те, що в плівкових системах на основі Co та Cr після конденсації реалізується фазовий склад ОЦК-Cr + ГЦП-Co з дефектами пакування у вигляді фази ГЦК-Co, при цьому плівки мають дрібнодисперсну структуру. На електроннограмах від плівок, відпалених до температури 800 та 1000 K, спостерігається зменшення ширини ліній від ОЦК-Cr. Рекристалізаційні процеси в плівках свідчать про утворення вакансій у зернах Cr унаслідок дифузії його атомів у плівку Co, що підтверджує факт термостимульованої дифузії та процесу утворення інтерметалідної фази CoCr.

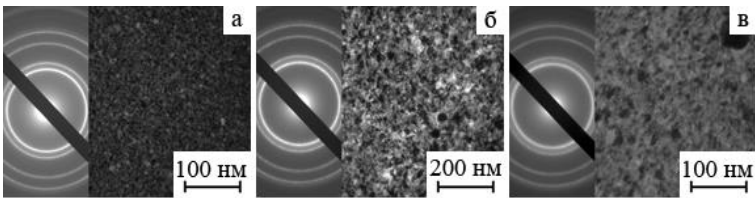


Рис. 1. Кристалічна структура і дифракційні картини від зразка $Co(9)/Cu(3)/Co(9)/P$ у невідпаленому (а), відпаленому до $T_e = 700$ (б) та 850 K (в) і охолодженому до 300 K станах (у дужках вказана товщина в нм, П – підкладка)

У свіжесконденсованих плівках від системи Fe/Cu на електроннограмах фіксуються окремі кільця, які відповідають фазам ОЦК – Fe та ГЦК – Cu, що свідчить про збереження індивідуальності шарів у процесі конденсації компонент. Після термообробки у них відбувається утворення матеріалу, близькому за своєю структурою до псевдосплаву.

У системах на основі Fe і Cr спостерігається утворення т. р. (α -Fe, Cr) з параметром решітки, близьким до масивних Fe та Cr, як для зразків у свіжесконденсованому стані, так і після термовідпалювання до різних температур ($0,287 - 0,289$ нм) у всьому об'ємі плівки вже в процесі конденсації компонент за рахунок конденсаційно-стимульованої дифузії.

У другому підрозділі наведені результати досліджень фазового складу наночастинок Co з оксидною оболонкою. Отримані результати були враховані та перенесені нами на випадок острівцевих та суцільних плівок Co як можливої елементної бази при створенні первинних перетворювачів. Аналіз результатів електронно-мікроскопічних досліджень (рис. 2) свідчить про те, що в оболонці наночастинок Co ($5 - 110$ нм) присутні дві оксидні фази CoO і Co_3O_4 . У той час як фаза CoO присутня переважно в прикорйових областях, фаза Co_3O_4 формується при скупченні частинок (рис. 3).

Третій підрозділ присвячено обговоренню й узагальненню результатів вивчення процесів фазоутворення у приладових структурах у вигляді плівкових систем на основі Co і Cu або Cr та Fe і Cu або Cr.

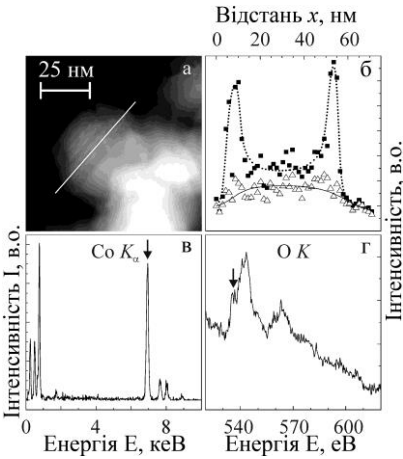


Рис. 2. Мікроснімок частинки Co (а), розподіл концентрації Co (суцільна) та O (точкова) вздовж лінії сканування (б), EDX-спектр від Co (в), EELS-спектр від O (г)

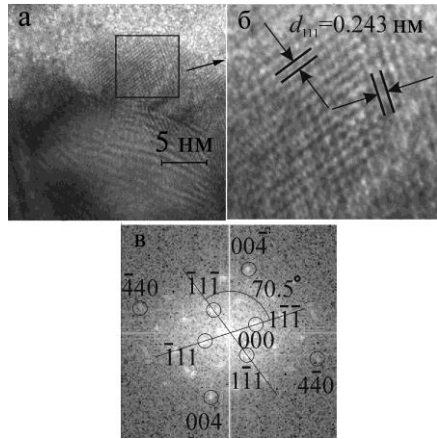


Рис. 3. Мікроснімок із високою роздільною здатністю наночастинки Co з оболонкою CoO (а). Фур'є-перетворення зображення від виділеної області оболонки (б) показано на (в)

Електронграфічні дослідження чотирьох типів плівкових систем залежно від варіації обраних компонент вказують на утворення в них структур із різним структурно-фазовим станом, а отже, й різними магнітними, магнітооптичними та магніторезистивними властивостями, що було використано нами при виборі оптимальної області застосування.

Четвертий розділ «Магніторезистивні властивості плівкових систем на основі Co і Cu або Cr та Fe і Cu або Cr» складається із двох підрозділів, присвячених дослідженню магніторезистивних властивостей чутливих елементів сенсорів, сформованих на основі плівкових систем Fe/Cu/Fe, Fe/Cr/Fe, Co/Cu/Co та Co/Cr/Co. Показано, що залежно від магніторезистивних характеристик розглянутих систем можуть бути обрані різні області практичного застосування первинних перетворювачів на їх основі.

У *першому підрозділі* наведені результати досліджень магніторезистивних властивостей плівкових систем на основі Fe і Cu або Cr.

Дослідження магніторезистивних властивостей плівкових систем на основі Fe і Cu або Cr проводилися для мультишарів $[\text{Fe}/\text{Cr}]_n$ та $[\text{Fe}/\text{Cu}]_n$, де $n = 15$ – кількість фрагментів. На рис. 4 наведені залежності величини МО від індукції зовнішнього магнітного поля для плівкової системи $[\text{Fe}/\text{Cr}]_n$ із загальною атомною концентрацією Fe у системі $c_{\text{Fe}} = 45$ ат.%. Аналіз результатів магніторезистивних досліджень для плівкових систем із концентрацією магнітної компоненти в системі 45 і 50 ат.% свідчить про ізотропність польових залежностей $R(B)$ у зразках у свіжесконденсованому стані та після

термообробки до 500 К незалежно від геометрії вимірювання. Після термообробки вище 900 К для цих систем зникає ізотропність МО. Для систем на основі Fe і Cr при ефективній товщині проміжного шару $Cr > 4$ нм залежності МО від індукції зовнішнього магнітного поля мають анізотропний характер, як і для одношарових феромагнітних плівок Fe.

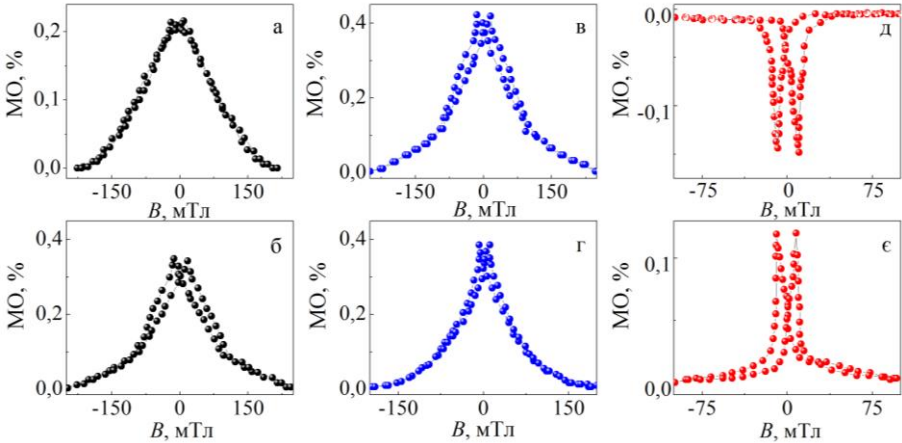


Рис. 4. Залежність величини МО від індукції зовнішнього магнітного поля плівкового зразка $[Fe(2,3)/Cr(2,8)]_{15}/P$ у невідпаленому стані (а, б) та після термообробки до $T_a = 500$ (в, г) і 900 К (д, е) у двох геометріях вимірювання – поздовжній (а, в, д) і поперечній (б, г, е)

Для багатшарових плівкових систем на основі Fe і Cu у більшості випадків характерна анізотропія МО, що пояснюється різною орієнтацією векторів намагніченості вздовж осі легкого чи важкого намагнічування. Така закономірність характерна для зразків із загальною атомною концентрацією $c_{Fe} > 50$ ат. % у системі, причому величина МО у більшості випадків не перевищує 0,05 %. При менших значеннях c_{Fe} анізотропія зникає, а величина МО значно збільшується (для $c_{Fe} = 48$ ат. % $MO = 0,1 - 0,2$ %), що може свідчити про наявність ГМО в мультишарах на основі Fe і Cu.

Результати досліджень МО в багатшарових плівкових системах на основі фрагментів Fe/Cu після термообробки до 700 К свідчать про зменшення величини МО порівняно з невідпаленими зразками, що можна пояснити ростом зерен при термообробці та процесами окиснення.

Другий підрозділ присвячено проведенню досліджень магніторезистивних властивостей одношарових плівок Co, мультишарів на основі Co і Cu та тришарових плівок на основі Co і Cu та Co і Cr.

Залежності зміни величини магнітоопору тришарових плівок на основі Co і Cu у свіжесконденсованому стані та після термообробки до різних температур

представлені на рис. 5 на прикладі плівкової системи Co/Cu/Co/П. Аналіз результатів магніторезистивних досліджень свідчить про ізотропність МО у всіх трьох геометріях вимірювання та термостабільність системи після термообробки до 700 К. На графіках залежності величини магнітоопору від індукції зовнішнього магнітного поля спостерігається лише незначне зменшення величини МО та B_C після термовідпалювання.

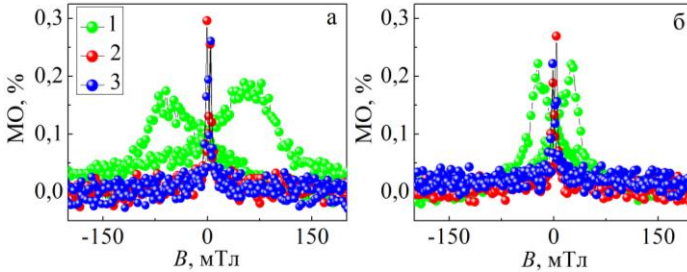


Рис. 5. Залежність величини МО від індукції зовнішнього магнітного поля плівкової системи Co(14)/Cu(7)/Co(14)/П у невідпаленому стані (а) та після термообробки до $T_e = 700$ К (б) у трьох геометріях вимірювання: 1 – перпендикулярній; 2 – поперечній; 3 – поздовжній

Із урахуванням температурної стійкості магніторезистивних властивостей та структурно-фазового стану досліджуваної системи було розглянуто її використання як складової основи мультишарів. На рис. 6 наведені залежності $MO(B)$ для двох типів мультишарів Co/Cu із різною товщиною немагнітного прошарку Cu. При збільшенні товщини нижнього шару Cu до 4 нм значення величини МО зменшується майже в 4 рази, однак величина B_C для обох розглянутих типів мультишарів майже не змінюється на відміну від тришарових плівок на основі Co і Cu.

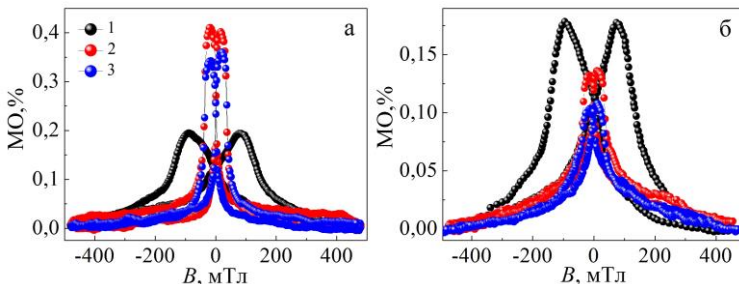


Рис. 6. Залежність величини МО від індукції зовнішнього магнітного поля плівкових систем Co(3)/Cu(4)/Co(3)/Cu(2)/Co(3)/П (а) та Co(3)/Cu(2)/Co(3)/Cu(4)/Co(2)/П (б) у свіжесконденсованому стані у трьох геометріях вимірювання: 1 – перпендикулярній; 2 – поперечній; 3 – поздовжній

На рис. 7 наведені типові залежності величини магнітоопору від індукції зовнішнього магнітного поля плівкової системи Co/Cr/Co/П у свіжесконденсованому стані та після термовідпалювання до $T_e = 800$ та 1000 К.

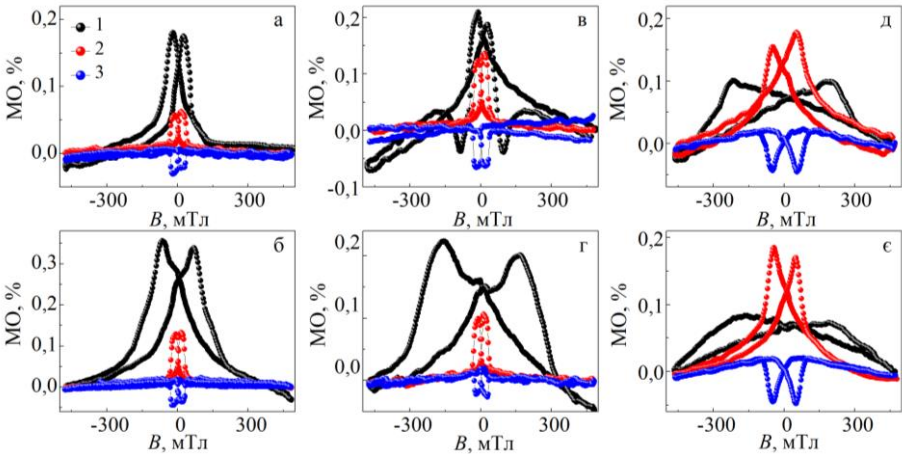


Рис. 7. Залежність величини МО від індукції зовнішнього магнітного поля плівкових зразків Co(5)/Cr(5)/Co(20)/П (а, в, д) та Co(5)/Cr(13)/Co(20)/П (б, з, е) у невідпаленому стані (а, б) та після термообробки до $T_e = 800$ К (в, з) і 1000 К (д, е) у трьох геометріях вимірювання: 1 – перпендикулярній; 2 – поперечній; 3 – поздовжній

Для плівкової системи Co/Cr/Co/П у свіжесконденсованому стані характерне невелике значення величини МО (0,1–0,3 %), при цьому максимальне значення 0,4 % було отримане в перпендикулярній геометрії вимірювання після термовідпалювання системи до $T_e = 800$ К при товщині проміжного шару $d_{Cr} = 20$ нм. Термообробка зразків до 800 К призводить до зростання значення величини МО приблизно вдвічі для всіх систем типу Co/Cr/Co. Необхідно зазначити, що у випадку високотемпературного відпалювання до $T_e = 1000$ К спостерігається поступове зменшення значення магнітоопору в перпендикулярній і поздовжній геометріях вимірювання та його зростання у всьому інтервалі температур у поперечній геометрії.

Аналіз залежностей величини магнітоопору від концентрації магнітної компоненти в системі свідчить про те, що при $c_{Co} = 60 - 66$ ат. % спостерігається максимум МО у всіх трьох геометріях вимірювання та мінімум при $c_{Co} = 70 - 75$ ат. % відповідно.

Також нами були проведені дослідження магнітних характеристик масиву наночастинок Co як граничного випадку острівцевих плівок. Отримані результати можуть бути застосовані при створенні чутливих елементів на основі систем, що складаються із немагнітної матриці із вкрапленням у неї

магнітних частинок, що є досить перспективним у сучасній сенсоріці. Дослідження були проведені для ансамблю наночастинок Co з окисдною оболонкою та середнім розміром 18 нм (діаметр ядра становив ~ 10 нм, а товщина окисної оболонки, у свою чергу, ~ 8 нм) при температурі 77 K за двох різних умов експерименту. Аналіз отриманих залежностей M від B свідчить про те, що для групи частинок, які були охолоджені у зовнішньому магнітному полі, характерним є розширення та зміщення петлі гістерезису на відміну від частинок, охолоджених без магнітного поля.

У разі, коли охолодження відбувається в зовнішньому магнітному полі, односпрямована вздовж зовнішнього магнітного поля обмінна анізотропія викликає зсув петлі гістерезису. Таку поведінку можна пояснити наявністю ефекту обмінного зміщення. У другому випадку осі обмінної анізотропії спрямовані вздовж осі легкого намагнічування, що обумовлено збереженням мінімуму енергії кристалографічної анізотропії. Як наслідок, система досягає мінімуму обмінної енергії. Така поведінка обумовлена прагненням системи перейти до найбільш вигідного положення і, в результаті, призводить до звуження петлі гістерезису.

П'ятий розділ «Магнітні та магнітооптичні властивості двокомпонентних плівкових систем» складається із трьох підрозділів, у яких проведений аналіз досліджень впливу загальної концентрації феромагнітної компоненти, термообробки та орієнтації зразка у зовнішньому магнітному полі на магнітооптичні та магнітні властивості плівкових систем Fe/Cu/Fe, Fe/Cr/Fe, Co/Cu/Co та Co/Cr/Co, що можуть бути використані як чутливі елементи датчиків магнітного поля.

Перший підрозділ присвячений узагальненню та обговоренню результатів, отриманих методом МОКЕ при дослідженні магнітооптичних властивостей тришарових плівок як функціональних елементів первинних перетворювачів. Показано, що одержані результати можуть дати інформацію не лише щодо процесів перемагнічування, які відбуваються в системі, а також підтвердити або спростувати висновки стосовно змін структурно-фазового стану, що відбуваються в плівкових системах на основі феромагнітних та немагнітних матеріалів.

Петлі гістерезису МОКЕ від одношарових плівок Co та Fe у свіжесконденсованому стані мають прямокутну форму з малим значенням величини коерцитивної сили. Це свідчить про те, що переорієнтація магнітних моментів у одношарових феромагнітних плівках відбувається при невеликих значеннях величини магнітного поля. У плівкових системах на основі Fe і Cu у процесі термовідпалювання внаслідок дифузійних процесів утворюються області неоднорідних магнітних станів, про що свідчить зміна форми кривої МОКЕ. Для систем Fe/Cr і Co/Cu загальна форма залежностей МОКЕ істотно не змінюється (рис. 8) після термообробки, оскільки в цих системах процеси утворення т. р. відбуваються ще на стадії конденсації компонент.

Що стосується плівкової системи Co/Cr/Co, то зі збільшенням загальної концентрації атомів Co спостерігається зменшення коерцитивної сили системи в обох геометріях вимірювання, що також свідчить про феромагнітний зв'язок між шарами. Цей висновок, у свою чергу, підтверджують результати структурно-фазового дослідження щодо збереження індивідуальності між шарами у свіжесконденсованому стані в цій системі.

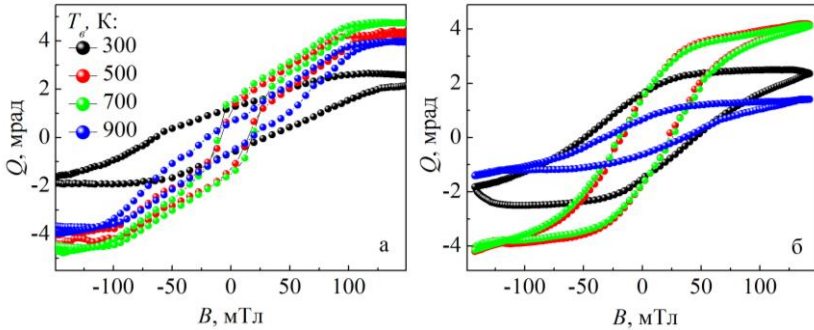


Рис. 8. Залежності величини МОКЕ після термообробки плівки Cu(10)/Co(15)/П до різних температур: а – поздовжня геометрія; в – перпендикулярна геометрія

У другому підрозділі наведені результати експериментальних досліджень магнітних властивостей тришарових плівок Fe/Cu/Fe, Fe/Cr/Fe, Co/Cu/Co та Co/Cr/Co з урахуванням впливу температури відпалювання, товщини шарів та кута повороту зразка у зовнішньому магнітному полі. Були проведені дослідження таких магнітних характеристик: величини B_C та K_{11} , залишкової намагніченості (M_R) і намагніченості насичення (M_S).

На відміну від одношарових плівок у багатошарових плівкових системах можливе спостереження анізотропії магнітних властивостей твердих розчинів, проміжних шарів, плівкових або гранульованих сплавів.

Анізотропний характер процесів намагнічування багатошарових плівкових систем можна спостерігати при вивченні величини їх намагніченості при переході від паралельної до перпендикулярної геометрії вимірювання. Для плівкової системи Fe/Cu/Fe на кривих гістерезису залежності намагніченості від зовнішнього магнітного поля наявний характерний перегин, що свідчить про шарове перемагнічування шарів Fe, які розділено досить товстим шаром Cu. Що стосується характеру залежності намагніченості для плівкової системи Fe/Cr/Fe, то петля гістерезису має форму, подібну до одношарових плівок Fe, що свідчить про перевагу феромагнітного зв'язку у системі.

Для усіх чотирьох систем простежується характерне збільшення величини B_C при переході від паралельної до перпендикулярної геометрії вимірювання (від 0 до 90°). Аналіз наведених даних свідчить про значну анізотропність

магнітних властивостей плівкових структур на основі фрагментів Co/Cr і Fe/Cr та перспективність застосування цих систем як чутливих елементів датчиків повороту або сенсорів магнітного поля. Детальний аналіз впливу товщини шарів і температури відпалювання на величини M_R , M_S , B_C та $KП$ петлі гістерезису був проведений для плівкових систем Co/Cr/Co як первинних перетворювачів магнітного поля.

При дослідженні магнітних властивостей плівкових систем як структурних елементів датчиків повороту необхідно також урахувувати вплив на магнітні характеристики зразка напрямку зовнішнього магнітного поля. На рис. 9 наведені залежності величини B_C від кута повороту зразка у полярних координатах (Θ) на прикладі плівкового зразка Co(15)/Cr(5)/Co(20)/П до і після термообробки.

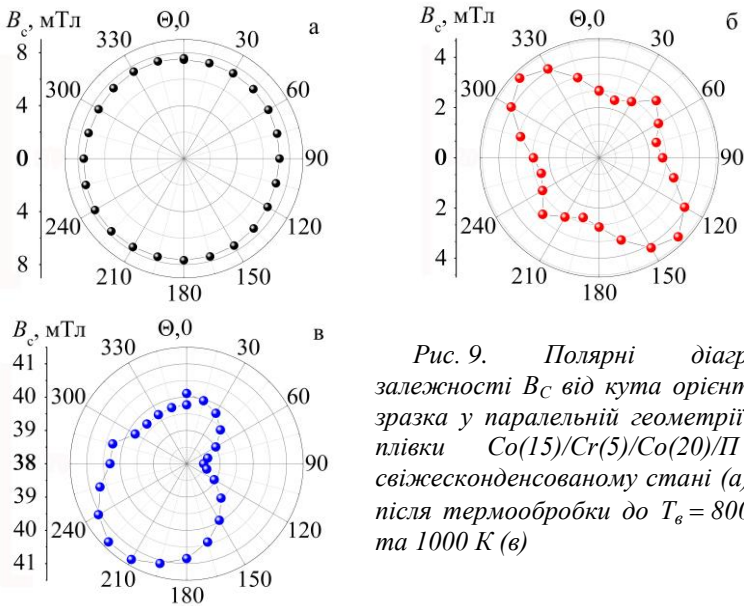


Рис. 9. Полярні діаграми залежності B_C від кута орієнтації зразка у паралельній геометрії для плівки Co(15)/Cr(5)/Co(20)/П у свіжесконденсованому стані (а) та після термообробки до $T_g = 800$ (б) та 1000 K (в)

У свіжесконденсованих зразках величина коерцитивної сили досягає максимального значення в усіх напрямках, що свідчить про ізотропність системи. Після термовідпалювання системи до $T_g = 800$ K у площині плівки відбувається формування двоосної анізотропії, що пов'язане із переходом від феромагнітного до антиферомагнітного зв'язку між шарами. Збільшення температури відпалювання до 1000 K приводить до менш вираженої анізотропії четвертого порядку в системі у площині плівки.

На рис. 10 наведені типові залежності B_C та M_R від прикладеного зовнішнього магнітного поля при переході від паралельної до перпендикулярної геометрії

вимірювання для тришарової плівкової системи Co(15)/Cr(5)/Co(20)/П при різних температурах. Аналіз кривих, наведених на рис. 10 а, свідчить про якісне узгодження експериментальних та розрахункових даних коерцитивної сили системи для усіх температур термообробки. Теоретичні розрахунки були здійснені за співвідношенням $B_C(\alpha) = B_C(0)/\cos\alpha$.

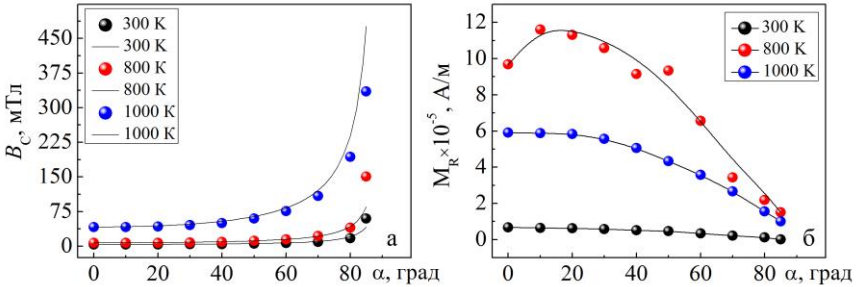


Рис. 10. Залежність величини коерцитивної сили (а) та залишкової намагніченості (б) тришарової плівкової системи Co(15)/Cr(5)/Co(20)/П при переході від паралельної до перпендикулярної геометрії вимірювання від температури відпалювання. Суцільна лінія – розрахунок

З аналізу залежностей залишкової намагніченості від кута повороту (α) можна відмітити, що у зразках безпосередньо після конденсації та після термообробки, при зміні кута α від 0 до 90° відбувається майже лінійне зменшення величини M_R . Відмітимо, що після термообробки до 800 K у системі спостерігається збільшення значення залишкової намагніченості до 10^{-4} А/м, що свідчить про велику кількість дефектів пакування та високу шорсткість інтерфейсів, яка поступово зменшується при зміні кута орієнтації або температури відпалювання.

Третій підрозділ присвячено детальному аналізу одержаних результатів для всіх чотирьох типів плівкових систем та запропоновано схематичну конструкцію тонкоплівкового чутливого елемента датчика.

Проведені дослідження структурно-фазового стану, магнітних (КП), магнітооптичних та магніторезистивних властивостей (середнє значення чутливості МО до B) різних типів чутливих елементів датчиків магнітного поля на основі плівкової системи Co/Me/Co або Fe/Me/Fe, де Me = Cr, Cu, дозволило визначити можливі області їх практичного застосування (табл. 1):

- структури на основі Co/Cu/Co завдяки високим значенням чутливості до магнітного поля можуть бути використані як чутливі елементи АМР-датчиків для швидкого реагування на зміну магнітного потоку;
- згідно з магнітними та магніторезистивними характеристиками структури на основі Fe/Cr/Fe можуть бути використані при створенні індукційних магнітних датчиків та спін-вентильних структур;

Таблиця 1
Значення основних параметрів первинних перетворювачів та їх можливі області застосування

Система	с, ат. %	T ₆ , К	МО, %						S _B , %/Гл			КП	Області практичного застосування		
			геометрії вимірювання						+		+			⊥	
				+	⊥	+		⊥							
Fe/Cr/Fe/Π	c _{Fe} = 41 – 80	300	0,2	0,3	0,1	1,5	2	0,1	0,85	0,71	Чутливі елементи індукційних магнітних датчиків				
			0,3	0,4	0,1	2	2,2	-	-	-					
			0,1	0,3	0,05	0,6	0,4	-	-	-					
Fe/Cu/Fe/Π	c _{Fe} = 48 – 90	300	0,1	0,05	0,05	2	0,8	-	0,87	0,74	Функціональний елемент спінін-клапанів. Первинний перетворювач датчиків магнітного поля				
			850	0,12	0,15	0,05	2,5	0,4	-	-		-			
Co/Cu/Co/Π	c _{Co} = 62 – 87	300	0,25	0,3	0,25	4	7	2	0,89	0,81	Чутливі елементи аналогових і цифрових схем для швидкого реагування на зміну магнітного потоку. Функціональний елемент спінін-клапанів Чутливі елементи АМР-датчиків				
			700	0,25	0,3	0,2	2	6	4	-		-			
Co/Cr/Co/Π	c _{Co} = 56 – 83	300	0,05	0,1	0,2	1,1	2,4	1,4	0,75	0,92	Складові спінін-вентильних структур. Чутливі елементи АМР-датчиків (0 – 90°, 0 – 360°).				
			800	0,1	0,15	0,25	2,1	3,2	1,6	0,85		0,93			
		1000	0,05	0,1	0,05	0,3	0,6	0,2	0,88	0,96	Чутливі елементи аналогових та цифрових схем для швидкого реагування на зміну магнітного потоку				

- структури на основі Co/Cr/Co можуть бути використані як складові спін-вентильних структур або чутливих елементів АМР-датчиків кута повороту в діапазоні кутів $0 - 90^\circ$ та $0 - 360^\circ$;
- що стосується плівкових систем на основі Fe та Cu, то згідно магніторезистивних досліджень на їх основі можуть бути створені стабільні функціональні елементи спін-клапанів або первинні перетворювачі сенсорів магнітного поля завдяки стабільності їх магніторезистивних і магнітних характеристик у широкому інтервалі температур.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проведені комплексні експериментальні дослідження встановлення взаємозв'язку між особливостями структурно-фазового стану, магнітооптичними та магніторезистивними властивостями і товщиною магнітних шарів і немагнітних прошарків, орієнтацією зразка у зовнішньому магнітному полі та температурою термообробки багатшарових плівкових систем на основі Co і Cu; Co і Cr; Fe і Cr та Fe і Cu із можливим спін-залежним розсіюванням електронів.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки:

1. Дослідження структурно-фазового стану тришарових плівкових систем у свіжесконденсованому стані та після термообробки, отриманих пошаровою конденсацією, як складових елементів первинних перетворювачів показали наступне:

- у системах на основі Co і Cu та Fe і Cr спостерігається утворення твердих розчинів у всьому об'ємі плівки; подальше термовідпалювання не приводить до змін фазового стану в плівковій системі Fe/Cr, однак у системах на основі Cu і Co після термообробки до 850 K спостерігається частковий розпад т. р. (Cu, Co) із виділенням гранул Co;

- плівкові системи Fe/Cu/Fe та Co/Cr/Co у свіжесконденсованому стані зберігають індивідуальність окремих шарів, після термообробки у системах на основі Fe/Cu відбувається утворення структури, подібної до псевдосплаву; зроблено висновок про можливість використання таких плівкових систем як чутливих елементів датчиків у широкому інтервалі температур.

2. У плівковій системі на основі Co і Cr після високотемпературного відпалювання (до $T_a = 1000$ K) спостерігається утворення інтерметаліду CoCr із тетрагональною решіткою.

3. Уперше проведені дослідження структурно-фазового стану та магнітних властивостей наночастинок Co, одержаних із оксидною оболонкою (CoO або Co₃O₄), а також вплив розміру таких частинок на коерцитивну силу й поле обмінного зміщення; було показано, що при зменшенні розміру частинок від 100 до 10 нм ефект обмінної магнітної анізотропії зростає, і при зменшенні температури до 77 K відбуваються зсув і зміна форми петлі гістерезису, що пояснюється орієнтацією

вектора намагніченості частинок уздовж осі легкої намагніченості.

4. Методом вібраційної магнітометрії та МОКЕ були досліджені магнітні й магнітооптичні властивості тришарових плівкових систем як функціональних елементів датчиків:

– результати досліджень методом магнітооптичного ефекту Керра підтверджують попередні висновки про утворення т. р. у плівкових системах Fe/Cr/Fe та Co/Cu/Co вже у процесі конденсації компонент, про формування в плівкових системах Co/Cr/Co високотемпературної інтерметалідної фази, а також про утворення псевдосплаву на основі Fe і Cu;

– проведені дослідження магнітних властивостей при переході від паралельної до перпендикулярної геометрії вимірювання (від 0 до 90°) виявили найбільшу схильність до прояву анізотропії плівкових систем на основі Cr, що свідчить про перспективність їх застосування в АМР-датчиках;

– уперше проведений аналіз залежностей намагніченості та коерцитивної сили від зовнішнього магнітного поля під дією температур при зміні кута орієнтації зразка у площині плівки від 0 до 360° у системах Co/Cr/Co, який свідчить про наявність принаймні однієї осі легкої намагніченості в площині плівки.

5. Проведені дослідження впливу геометрії вимірювання, температури термообробки й загальної концентрації феромагнітної компоненти в системі на магніторезистивні властивості чутливих елементів датчиків на основі чотирьох типів плівкових систем дозволили визначити можливі практичні області їх застосування:

– структури на основі Co/Cu/Co та Fe/Cr/Fe завдяки досить високим значенням чутливості плівкової системи до магнітного поля можуть бути використані в аналогових та цифрових схемах для швидкого реагування на зміну магнітного потоку;

– структури на основі Co і Cr характеризуються великими значеннями КП (0,9) й термічною стабільністю у широкому діапазоні температур, що дає можливість використовувати їх при створенні індукованих пристроїв запису інформації або як закріплюючий шар спін-вентильних структур;

– згідно з магніторезистивними дослідженнями плівкові системи на основі Fe та Cu можуть бути застосовані для створення стабільних датчиків магнітного поля, основною функцією яких є детектування слабких полів; перевагою цих структур є стабільність характеристик у широкому інтервалі температур, що виключає вплив температурного фактора на роботу датчиків.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. Магнітооптичні властивості гранульованих плівкових систем на основі Co та Cu, Ag та Au / [Д. М. Кондрахова, І. Ю. Проценко, О. В. Кузовлев, О. П. Ткач,

3. М. Макуха] // Фізична інженерія поверхні. – 2014. – Т. 12, № 4. – С. 542 – 549.

2. **Kondrakhova D.M.** Thin film systems based on Co and Cr or Cu: magnetoresistive properties and application / [**D. M. Kondrakhova**, I. M Pazukha, I. Yu. Protsenko] // Universal J. Phys. and Appl. – 2014. – V. 2, № 2. – P. 85 – 89.

3. Magneto-optical and magnetoresistive properties of solid-solution films / [I. V. Cheshko, **D. M. Kondrakhova**, L. V. Odnodvoret, O. O. Pylypenko, Yu. M. Shabelnyk] // Universal J. Mater. Sci. – 2013. – V.1, № 2. – P. 25 – 30.

4. Investigation of exchange bias effect of fine cobalt particles with oxidized surface / [**D. M. Kondrakhova**, S. A. Nepijko, A. Petrov, I. Yu. Protsenko, H. J. Elmers, G. Schonhense] // J. Nanopart. Res. – 2013. – V. 15, № 5. – P. 1 – 7.

5. Магніторезистивні та магнітооптичні властивості пліткових систем із можливим спін-залежним розсіюванням електронів (огляд) / [I. В. Чешко, I. Ю. Проценко, Л. В. Однодворець, **Д. М. Кондрахова**, О. В. Пилипенко, О. В. Власенко, Ю. М. Шабельник] // Успехи физ. мет. – 2013. – Т. 14. – С. 229 – 257.

6. Структурно-фазовий стан, електрофізичні та магнеторезистивні властивості твердих розчинів у пліткових системах на основі Co і Cu або Ag та Fe і Cr або Cu (огляд) / [**Д. М. Кондрахова**, Ю. М. Шабельник, О. В. Синашенко, I. Ю. Проценко] // Успехи физ. мет. – 2012. – Т. 13. – С. 241 – 267.

7. **Кондрахова Д. М.** Кристалічна структура і магнеторезистивні властивості пліткових систем на основі Fe і Cu / [**Д. М. Кондрахова**, О. В. Синашенко, I. Ю. Проценко] // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2011. – Т. 9, № 3. – С. 589 – 598.

8. Synashenko O. V. Magnetoresistive properties of Fe films and Fe-based multilayers / [O. V. Synashenko, **D. M. Kondrakhova**, I. Yu. Protsenko] // J. Nano-Electron. Phys. – 2010. – V. 2, № 4. – P. 153 – 168.

9. Magnetic properties of fine cobalt particles with oxidized shell / [**D. Kondrakhova**, I. Protsenko, S. A. Nepijko, G. Schönense] // Book of abstracts of International conference of students and young researchers in theoretical and experimental physics, [«HEUREKA-2012»], (Lviv, April 19 – 22, 2012). – Lviv : LNU, 2012. – P. D 45.

10. Magneto-Optic Properties of Multilayer Film Systems with Giant Magnetoresistance / [**D. M. Kondrakhova**, O. V. Pylypenko, Yu. M. Shabelnyk, L. V. Odnodvoret, I. Yu. Protsenko] // Book of abstracts of International Conference [«CNM-3»]. – Uzhhorod, 2012. – P. 54.

2. Наукові праці апробаційного характеру

11. Електрофізичні та магніторезистивні властивості наноструктурованих пліткових матеріалів / [**Д. М. Кондрахова**, О. В. Власенко, Л. В. Однодворець, О. В. Пилипенко, I. Ю. Проценко, Ю. М. Чешко, Ю. М. Шабельник] // матеріали 5-ї Міжнародної наукової конференції [«Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур» (ФММН-2011)], (Харків, 12 – 14 жовтня 2011 р.). – Харків, 2011. – Т. 1. – С. 304 – 309.

12. **Кондрахова Д. М.** Дослідження магніторезистивних та магнітооптичних властивостей в плівковій системі на основі Fe/Cu / [Д. М. Кондрахова] // тези доповідей Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«ЕВРИКА-2014»], (Львів, 15 – 17 травня 2014 р.). – Львів: ЛНУ, 2014. – С. 60.

13. **Кондрахова Д. М.** Анізотропний магнітоопір у плівковій системі на основі кобальту і хрому / [Д. М. Кондрахова] // матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету ЕлІТ [«Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ-2013)], (Суми, 22 – 27 квітня 2013 р.). – Суми: СумДУ, 2013. – С. 97.

14. Magneto-optical and magnetoresistive properties of thin film granular solid solution / [D. M. Kondrakhova, I. V. Cheshko, I. Yu. Protsenko, Yu. M. Shabelnyk] // Book of abstracts of International conference of the physics and technology of thin films and nanosystems [ICPTTFN-XIV], (Ivano-Frankivsk, May 20 – 25, 2013). – Ivano-Frankivsk, 2013. – P. 31.

15. **Кондрахова Д. М.** Магніторезистивні властивості плівкових систем Co/Cu та Co/Cr / [Д. М. Кондрахова, І. І. Буряк, І. Ю. Проценко] // матеріали XVI Міжнародного молодіжного форуму [«Радиоелектроника и молодежь в XXI веке»], (Харків, 17 – 19 квітня 2012 р.). – Харків : ХНУРЕ, 2012. – С. 67 – 68.

16. **Kondrakhova D. M.** Study of structure-phase state of Co/Cu granular film systems / [D. M. Kondrakhova, I. Yu. Protsenko] // Book of abstracts of III International Conference for Young Scientists [“LOW TEMPERATURE PHYSICS” (ICYS-LTP-2012)], (Kharkiv, May 14 – 18, 2012). – Kharkiv : ІЛТРЕ, 2012. – P. 173.

17. **Кондрахова Д. М.** Дослідження електрофізичних та магніторезистивних властивостей плівкових систем на основі Co і Cr / [Д. М. Кондрахова, І. Ю. Проценко] // матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету ЕлІТ [«Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ-2012)], (Суми, 16 – 21 квітня 2012 р.). Суми : СумДУ, 2012. – С. 96.

18. **Кондрахова Д. М.** Магніторезистивні властивості в плівкових системах на основі Fe/Cu і Co/Cr / [Д. М. Кондрахова, О. В. Синашенко, О. А. Стеценко] тези доповідей Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики [«ЕВРИКА-2011»], (Львів, 18 – 20 травня 2011 р.). – Львів: ЛНУ, 2011. – С. С17.

19. Magnetoresistive properties of Fe/Cu multilayers / [D. M. Kondrakhova, O. V. Synashenko, I. Yu. Protsenko, M. Marszalek] // Book of the materials XLVI International conference [«Zakopane school of physics 2011»]. – Zakopane, 2011. – P. 143.

3. Праці, які додатково відображають наукові результати

20. Магніторезистивні властивості плівок Fe та мультишарів на їх основі / [Д. М. Кондрахова, О. О. Стеценко, О. В. Синашенко, І. І. Буряк] // матеріали

науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів та студентів факультету ЕЛІТ [«Фізика, електроніка, електротехніка» (ФЕЕ-2011)] (Суми, 18 – 22 квітня 2011 р.). – Суми : СумДУ, 2011. – С. 93.

21. Апробація теоретичного моделю розмірного ефекту в магнетоопорі / [Д. М. Кондрахова, О. П. Ткач, Л. В. Однодворець, І. Ю. Проценко] // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2011. – Т. 9, № 4. – С. 801–807.

22. **Kondrakhova D. M.** Magnetoresistive properties of multilayer film system based on Fe/Cu / [D. M. Kondrakhova, I. Yu. Protsenko, O. V. Synashenko] // Матеріали II наукового семінару [«Сучасні проблеми наноелектроніки – 2011»]. – Суми : СумДУ, 2011. – С. 11 – 12.

23. **Kondrakhova D. M.** Magnetoresistive properties of multilayers based on Fe/Cu and Fe/Pd / [D. M. Kondrakhova, O. V. Synashenko, I. Yu Protsenko, I. V. Tkach, L. V. Odnodvoretz] // Book of abstracts of International conference of the physics and technology of thin films and nanosystems [ICPTTFN-XIII], (Ivano-Frankivsk, May 16 – 21, 2011). – Ivano-Frankivsk, 2011. – P. 141.

АНОТАЦІЯ

Кондрахова Д. М. Взаємний зв'язок властивостей і структури плівкових чутливих елементів сенсорів магнітного поля. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Сумський державний університет, Суми, 2015.

Дисертацію присвячено комплексним експериментальним дослідженням особливостей структурно-фазового стану та магнітних і магніторезистивних властивостей багат шарових плівкових систем на основі Co і Cu, Co і Cr, Fe і Cr та Fe і Cu як можливих матеріалів чутливих елементів сенсорів різного призначення. У роботі встановлено взаємозв'язок між товщиною магнітних шарів і немагнітних прошарків, орієнтацією зразка у зовнішньому магнітному полі, температурою термообробки та магнітними, магніторезистивними і магнітооптичними властивостями багат шарових плівкових систем із можливим спін-залежним розсіюванням електронів.

Визначені величини магнітоопору, коерцитивної сили, коефіцієнта прямокутності й чутливості плівкової системи до магнітного поля досліджуваних плівкових систем як приладових структур для формування первинних перетворювачів. Установлена кореляція між структурно-фазовим станом, магнітними та магнітооптичними властивостями тришарових плівкових систем з різним типом розчинності компонент як функціональних елементів датчиків.

Запропонована схематична конструкція АМР-датчика магнітного поля для тришарових плівкових систем із спін-залежним розсіюванням електронів. У результаті проведених досліджень впливу геометрії вимірювання, температури термообробки та загальної концентрації феромагнітної компоненти в системі на

магнітні й магніторезистивні властивості визначені можливі області застосування плівкових систем на основі Co і Cu або Cr та Fe і Cu або Cr.

Ключові слова: тонкі плівки, фазовий склад, магнітооптичні властивості, магнітні властивості, магнітоопір, коерцитивна сила, чутливість до магнітного поля, чутливий елемент датчика.

АННОТАЦІЯ

Кондрахова Д. М. Взаимосвязь свойств и структуры пленочных чувствительных элементов сенсоров магнитного поля. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов, элементов и систем. – Сумский государственный университет, Сумы, 2015.

Диссертация посвящена комплексным экспериментальным исследованиям особенностей структурно-фазового состояния, магнитных магнорезистивных свойств многослойных пленочных систем на основе Co и Cu, Co и Cr, Fe и Cr и Fe и Cu в качестве возможных материалов чувствительных элементов сенсоров различного назначения. В работе установлена взаимосвязь между толщиной магнитных слоев и немагнитных прослоек, ориентацией образца во внешнем магнитном поле, температурой термообработки и магнитными, магнорезистивными и магнітооптичскими свойствами многослойных пленочных систем с возможным спин-зависимым рассеянием электронов.

При исследовании магнитных свойств пленочных систем на основе Fe, Co, Cu или Cr получено, что для пленочных систем на основе Fe и Cu в форме кривых гистерезиса наблюдается определенный перегиб, свидетельствующий о послойном перемагничивании слоев Fe, в то время как для систем на основе Fe и Cr петля гистерезиса имеет форму, подобную однослойным пленкам Fe, что говорит о преобладании ферромагнитной связи в системе. В пленочных структурах на основе Co и Cr или Cu магнитные свойства системы главным образом определяются состоянием слоев Co, поэтому форма кривых гистерезиса для обеих систем схожа с формой кривых для однослойных пленок Co, а небольшие значения коэрцитивной силы свидетельствуют о реализации ферромагнитной связи в системе.

Все четыре системы характеризуются достаточно высоким значением коэффициента прямоугельности, которое при смене ориентации образца от 0 до 90° несколько уменьшается для систем Fe/Cu/Fe и Fe/Cr/Fe и, наоборот, растет в системах на основе Co и Cr.

Определены величины магнитосопротивления, коэрцитивной силы, коэффициента прямоугельности и чувствительности пленочной системы к магнитному полю исследуемых пленочных систем как приборных структур для формирования первичных преобразователей. Установлена корреляция между структурно-фазовым состоянием, магнитными и магнітооптичскими

свойствами трехслойных пленочных систем с разным типом растворимости компонент в качестве функциональных элементов датчиков. Предложена схематическая конструкция АМР-датчика магнитного поля для трехслойных пленочных систем со спин-зависимым рассеянием электронов. В результате проведенных исследований влияния геометрии измерения, температуры термообработки и общей концентрации ферромагнитной компоненты в системе на магниторезистивные свойства определены возможные области применения пленочных систем на основе Co и Cu или Cr и Fe и Cu или Cr.

Ключевые слова: тонкие пленки, фазовый состав, магнитооптические свойства, магнитные свойства, магнитосопротивление, коэрцитивная сила, чувствительность к магнитному полю, чувствительный элемент датчика.

ABSTRACT

Kondrakhova D. M. Interrelation between the properties and structure in the sensitive film elements of the magnetic field sensors. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D.) in Physics and Mathematics on speciality 01.04.01 – Physics of devices, elements and systems. – Sumy State University, Sumy, 2015.

The thesis is dedicated to the complex experimental research between the structural-phase state, magnetic and magnetoresistance properties of multilayer film systems based on the Co and Cu, Co and Cr, Fe and Cr, and Fe and Cu, as the potential materials for sensitive elements of sensors for different purposes. In this thesis was found the correlation between the thickness of the magnetic and nonmagnetic layers, the orientation of the sample in an external magnetic field, temperature of heat treatment and magnetic, magnetoresistive and magneto-optical properties in multilayer film systems with possible spin-dependent scattering of electrons.

The values of magnetoresistance, coercivity, squareness factor and sensitivity of film system to a magnetic field in the studied film systems as device structures for the formation of primary converters were defined. The correlation between the structural-phase state, magnetic and magneto-optical properties of three-layer film systems with different types of component solubility as functional elements sensors was established.

The schematic structure of AMR sensor for three-layer film systems with spin-dependent scattering of electrons was purposed. The possible areas of applications was identified on the basis of studies of the effect of geometry measurement temperature heat treatment and the total concentration of ferromagnetic components in the system on the magnetic and magnetoresistive properties of film-systems based on Co and Cu, or Cr and Fe, and Cu or Cr.

Key words: thin films, phase composition, magneto-optical properties, magnetic properties, magnetoresistance, coercivity, sensitivity to magnetic field, sensitive element of sensor.

Підписано до друку 27.03.2015.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 пр. Зам. № 381

Видавець і виготовлювач
Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.